

УДК 621.165

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЗАЦІЇ ПАРИ НА РОБОЧІ ПРОЦЕСИ ВОЛОГОПАРОВОЇ ТУРБОУСТАНОВКИ

**А. В. Нечаєв,**

канд. техн. наук

[nechaev@ipmach.kharkov.ua](mailto:nechaev@ipmach.kharkov.ua)

ORCID: 0000-0001-6586-4713

**А. О. Тарелін,**

член-кор. НАН України

[tarelin@ipmach.kharkov.ua](mailto:tarelin@ipmach.kharkov.ua)

ORCID: 0000-0001-7160-5726

**І. Є. Аннопольська,**

канд. техн. наук

[anna@ipmach.kharkov.ua](mailto:anna@ipmach.kharkov.ua)

ORCID: 0000-0002-3755-5873

Інститут проблем

машинобудування

ім. А. М. Підгорного

НАН України,

61046, Україна, м. Харків,

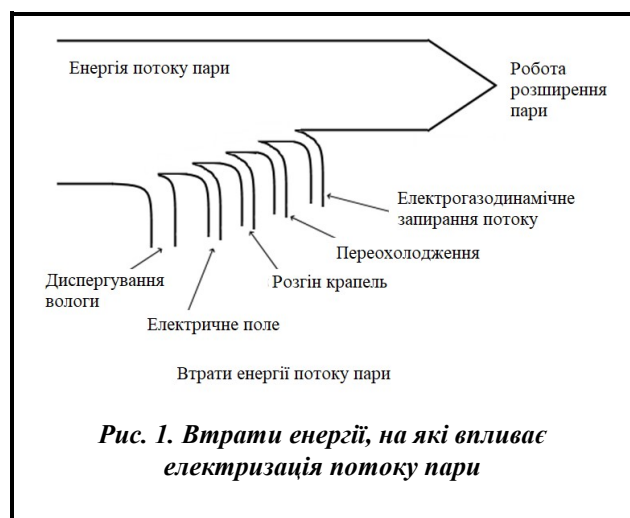
вул. Пожарського, 2/10

У статті розглянуто вплив електризації пари на роботу вологопарової турбоустановки, а також основні процеси, чутливі до електризації робочого тіла, вказані види додаткових втрат, зумовлених електризацією. Зазначено, що в існуючих на даний час фізичних і математичних моделях ці втрати не враховуються, оскільки дані про електризацію не беруться до уваги і немає можливості зробити чіткий теоретичний опис електрофізичної моделі навіть нейтральної пари. У зв'язку з цим вивчено спрощену якісну фізичну модель електрофізичних процесів, що виникають при електризації потоку пари в турбіні. Виходячи з цього, зроблено припущення щодо властивостей об'ємного заряду в потоці пари, що є джерелом електричного поля і визначає його інтенсивність й просторовий розподіл у проточній частині. Проведено якісний аналіз впливу поля об'ємного заряду на фізичні й термодинамічні властивості потоку пари з прийнятими припущеннями. Запропоновано процес поляризації пари в полі об'ємного заряду сприймати як основний результат його впливу, а діелектричну проникність пари – як найбільш представницький параметр, що характеризує термодинамічний стан, у тому числі за наявності впливу поля. Наведено термодинамічні співвідношення роботи діелектрика в електричному полі. Показано зв'язок діелектричної проникності пари зі зміною внутрішньої енергії робочого тіла, його ентропії й вільною енергією. Теоретично обґрунтовано, що вплив електричного поля призводить також до зміни ізобарної теплоємності й ентальпії. Зроблено висновок про те, що процес розширення вологопарового потоку зарядженої пари в турбоустановці може супроводжуватися зміною основних термодинамічних параметрів робочого тіла, а отже, можуть змінитися його розрахункові характеристики, у тому числі й втрати, що виникають у процесі розширення. На основі отриманих раніше експериментальних даних на реальних турбінах проведено чисельну оцінку зміни термодинамічних параметрів робочого тіла при впливі електричного поля. Виконані чисельні дослідження однозначно свідчать про необхідність як врахування в існуючих фізичних і математичних термодинамічних моделях процесу розширення вологої пари явищ, зумовлених електризацією вологопарового потоку в циліндрі низького тиску, так і уточнення основних термодинамічних параметрів і розрахункових характеристик потоку електризованої вологої пари залежно від зміни його діелектричної проникності.

**Ключові слова:** вологопарові турбіни електризація пари, діелектрична проникність, термодинамічні параметри.

### Вступ

Як відомо, у процесі роботи вологопарових турбоустановок робоче тіло може електризуватися, при цьому в потоці електрично нейтральної водяної пари з'являються заряджені краплі, що утворюють об'ємний електричний заряд. Їх наявність суттєво впливає на робочі процеси турбоустановки [1]. Найбільш чутливими до цього є: процес конденсації, характер течії парового потоку й ерозійно-корозійні процеси. Крім того, слід зазначити, що процес розширення пари, яка конденсується, в електричному полі об'ємного заряду належить до нерівноважного типу термодинамічних процесів із додатковими втратами енергії на протікання електрофізичних процесів і зміну внутрішньої енергії пари. На рис. 1 наведена діаграма втрат, зумовлених електризацією потоку пари.



**Рис. 1. Втрати енергії, на які впливає електризація потоку пари**

### Фізична модель електрофізичної дії на пару

У даний час в існуючих фізичних і математичних моделях термодинамічних і газодинамічних процесів, що використовуються при проектуванні вологопарових паротурбінних установок, вплив електризації не враховується. Це відбувається насамперед тому, що дані про електризацію не беруться до уваги, а також тому, що в даний час неможливо виконати суворий теоретичний опис електрофізичної моделі навіть вологої нейтральної пари [2].

Електризація вологої пари ще більше ускладнює завдання моделювання, тому на даному етапі можна спробувати побудувати лише наближену якісну модель складного

термодинамічного процесу в турбіні, ґрунтуючись на найбільш загальних фізичних процесах, що протікають під час електризації пари. Розглянемо їх докладніше.

Основним електричним фактором, що впливає на термодинамічний процес розширення вологої пари при його спонтанній електризації, нині прийнято вважати електричне поле об'ємного заряду, що виникає в об'ємі пари [1] завдяки наявності заряджених крапель у потоці пари. Дане поле розглядається як зовнішнє електричне поле, що діє на діелектрик – водяну пару, яка здійснює роботу розширення. При цьому масив заряджених крапель чинить на потік робочого тіла електрогазодинамічний вплив, збільшуючи втрати на розгін крапельної вологи [1].

Характеристики джерела поля, що наводяться в літературі [1], показують, що його ядром фактично є кільцева область у периферичній зоні простору проточної частини циліндра низького тиску (ЦНТ), в якій зосереджена більша частина великодисперсної вологи. Залежно від воднохімічного режиму ядро об'ємного заряду може дещо змінювати свою форму, але вона в цілому зберігає свій вигляд. Фрагменти двох перерізів ядра об'ємного заряду у просторі ЦНТ [1] показано на рис. 2.

У цілому заряджену область робочого тіла в ЦНТ зображують у спрощеному вигляді як фрагмент проточної частини, в якій поступово збільшується об'ємний заряд. Це показано на рис. 3.

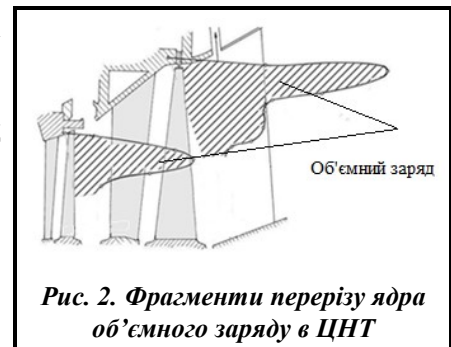


Рис. 2. Фрагменти перерізу ядра об'ємного заряду в ЦНТ

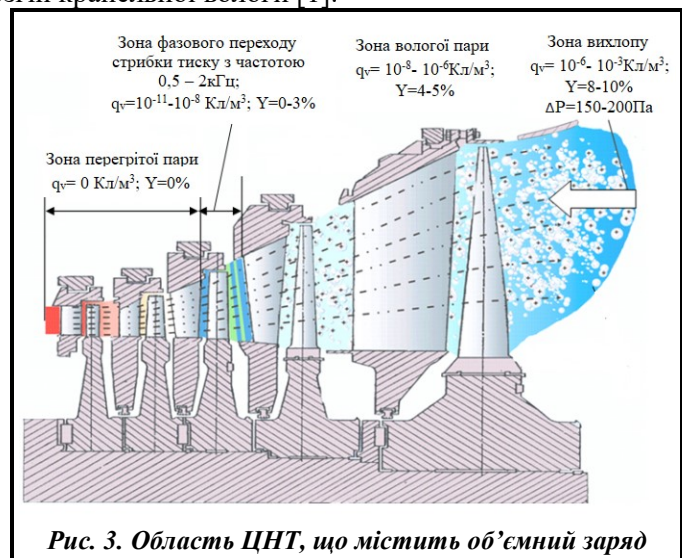


Рис. 3. Область ЦНТ, що містить об'ємний заряд

Однак схеми і рисунки, на яких показано кінетику процесу електризації, не відображають характеру дії електричного поля на фізичні й термодинамічні властивості водяної пари. З огляду на це вони мають бути доповнені відповідними схемами електрофізичних процесів.

Із цієї точки зору робоче тіло в останніх ступенях турбіни можна розглядати як двокомпонентне середовище – парову фазу, що виконує корисну роботу, і краплинну фазу, дисперговану в об'ємі пари і яка є джерелом розподіленого в об'ємі електричного поля, а також чинить електрогазодинамічний вплив уздовж потоку. Як показують дослідження, проведені на реальних турбінах, краплинна фаза заряджена неоднорідно: великі краплі переважно позитивно, а дрібні негативно. У цілому паровий потік у турбіні зазвичай має позитивний заряд, який маскує негативний, істотно менший за величиною. Для спрощення фізичної моделі теплоелектрофізичних процесів у турбіні у цій статті розглядатимемо лише позитивний заряд потоку. Крім того, не враховуватимемо просторову неоднорідність розподілу рідкої фази по висоті лопаток, у кромковому сліді тощо.

Для коректної оцінки впливу електричного поля на фізичні властивості пари необхідно використовувати відповідну електрофізичну модель вологої пари із джерелом електричного поля. У даному випадку, враховуючи те, що з фізичної точки зору водяна пара є діелектричним середовищем, існує кілька можливих підходів до побудови спрощеної фізичної моделі такого середовища з джерелом поля.

Статичні варіанти, за яких розглядається:

– нерухомий об'єм пари як однорідний діелектрик, обмежений каналом змінного профілю із заземленими стінками, що проводять, а джерело електричного поля – об'ємний заряд – локальна заряджена область всередині об'єму діелектрика;

– об'єм вологої пари як двофазне середовище – діелектрик, що являє собою механічну суміш газової та зарядженої краплинної фаз із рівномірним заповненням простору всередині заземленого провідного каналу.

Кінетичний варіант:

– пара – двофазний потік усередині провідного заземленого каналу, що складається з газоподібного діелектрика, який виконує роботу розширення, і дисперсної фази у вигляді заряджених частинок, які можна уявити або провідними сферами малого радіусу, або краплями поляризованої води в рідкому стані з точковим зарядом усередині краплі.

Беручи до уваги різницю швидкостей рідкої та парової фаз, більш прийнятною моделлю середовища із джерелом поля буде кінетичний варіант.

Як відомо [3], основними процесами, що виникають у діелектрику під дією зовнішнього електричного поля, є електропровідність, поляризація й розсіювання енергії. У електротехніці процеси електропровідності й поляризації в постійному електричному полі схематично подаються у вигляді об'єму діелектрика з умовним зображенням вільних і пов'язаних зарядів, до якого додано поле зовнішніх електродів (рис. 4).

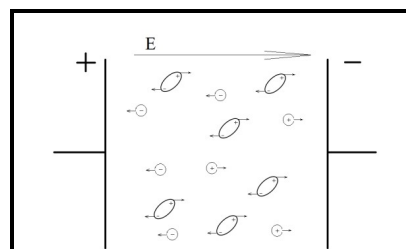


Рис. 4. Об'єм діелектрика з диполями та вільними зарядами у постійному полі

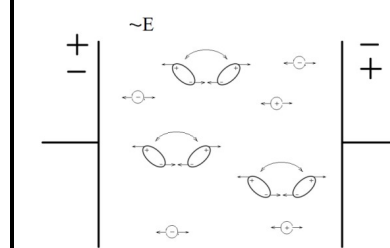


Рис. 5. Об'єм діелектрика у змінному полі

У змінному електричному полі заряджені частинки й диполі виконують коливальний рух (рис. 5).

Зазначимо, що характер дії зовнішнього електричного поля на конкретний діелектрик залежить від його молекулярних властивостей. Так, вода і, відповідно, водяна пара є полярним діелектриком, який у разі відсутності в ньому вільних електрично заряджених частинок не проводить електрику, однак за наявності заряджених частинок в об'ємі пари в електричному полі виникатиме струм провідності. Крім нього, дія електричного поля викликає поляризацію речовини. Як відомо, кількісно здатність речовини до поляризації оцінюється її відносною діелектричною проникністю  $\epsilon$ , яка є безрозмірною величиною [3]. Розсіювання енергії може виникати при дії на діелектрик змінним електричним полем.

Розглянемо фактори електричного поля, що діють на потік пари, з прийнятими припущеннями.

Оскільки в даному випадку ми беремо до уваги лише позитивно заряджені великі краплі як джерело зовнішнього, по відношенню до потоку пари, електричного поля, то електропровідність пари за рахунок позитивно заряджених частинок не враховуємо.

Також не беремо до уваги вплив на теплофізичні властивості пари дрібних негативно заряджених крапель в її об'ємі в електричному полі, які можуть забезпечувати деякий струм провідності, тим більше, що кількість негативних крапель суттєво менша за позитивних.

В електричному полі відбуватиметься поляризація діелектрика. Водяна пара, з одного боку, складається з полярних молекул, тому в її поляризації мають місце дві компоненти: орієнтаційна й електронна. З іншого – діюче на пар електричне поле можна розглядати як змінне у часі, оскільки швидкість пари перевищує швидкість крапельної фази, а з урахуванням точкових джерел, істотно неоднорідним за структурою. На рис. 6 схематично зображено розподіл напруженості електричного поля вздовж проточної частини ЦНТ.

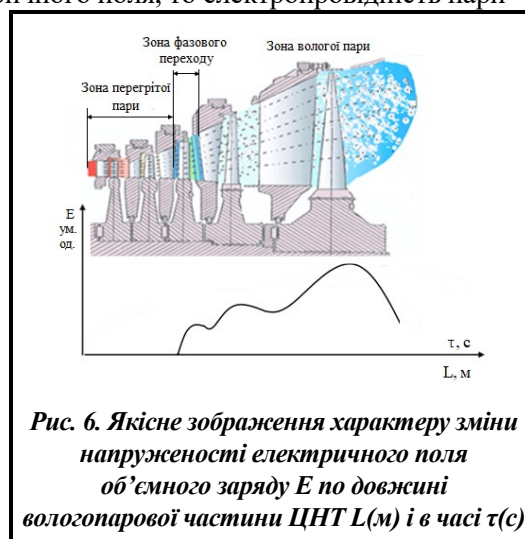


Рис. 6. Якісне зображення характеру зміни напруженості електричного поля об'ємного заряду  $E$  по довжині вологопарової частини ЦНТ  $L(m)$  і в часі  $\tau(c)$

У даному випадку для спрощення фізичної моделі, що розглядається, має сенс зважати тільки на поляризацію парової фази, бо краплинна фаза знаходиться не в зовнішньому електричному полі (власне краплинна фаза є джерелом поля), у зв'язку з чим з'являється деяка невизначеність можливості оцінки характеру впливу її власного об'ємного заряду на поляризацію крапель. Однак, виходячи з того, що поляризація краплинної фази не виконує роботи розширення, її в даному випадку можна не враховувати. Просторовий розподіл напруженості електричного поля  $E$  довкола ядра об'ємного заряду  $Q$  представлено на рис. 7, 8.

Процес поляризації пари буде складним у просторі й часі, а діелектрична проникність, що є основною характеристикою поляризації діелектрика, в електротехніці у такому випадку розглядається як комплексна величина. Відповідно, при дії змінного електричного поля, крім поляризації, виникає поглинання енергії поля на нагрівання діелектрика. Однак у цьому випадку, пам'ятаючи про прийняті спрощення, діелектричну проникність будемо приймати за дійсну величину без уявної частини, нехтуючи втратами на нагрівання, через їх незначність. Таким чином, у фізичній моделі не братимемо до уваги втрати енергії на нагрівання, так само як і провідність. У цілому прийняті припущення і спрощення

дозволяють якісно розглядати найважливіші фізичні процеси в потоці пари в турбіні за його електризації та виокремити діелектричну проникність як найбільш представницький параметр, що характеризує ці процеси.

### Математична модель теплоелектрофізичних процесів

Розглянемо далі математичний апарат, що використовується для опису складної термодинамічної системи, у якій робота діелектрика відбувається під дією електричного поля. Для спрощення оберемо варіант електростатичного поля.

Як відомо з теоретичних основ термодинаміки [4, 5], термодинамічна система, в якій, крім роботи розширення, виконуються інші види роботи, є складною термодинамічною системою. Зокрема, під впливом зовнішніх полів різної фізичної природи вода й водяна пара можуть змінювати свої теплофізичні й фізичні властивості. Цей вплив можна вважати фактором додаткової роботи, яка здійснюється над термодинамічною системою.

У цьому випадку спільне рівняння 1-го і 2-го законів термодинаміки має вигляд (у разі рівноваги)

$$TdS = dU + pdV - \sum \zeta dx, \quad (1)$$

де  $\zeta$  – узагальнена сила;  $x$  – узагальнена координата;  $\zeta dx$  – робота, що здійснюється над системою.

Якщо розглядати тільки роботу розширення, то рівняння (1) спрощується і набуває вигляду

$$TdS = dU + pdV. \quad (2)$$

### Робота діелектрика в електростатичному полі

Для діелектрика, з урахуванням лише поляризації від прикладеного зовнішнього стаціонарного електричного поля, рівняння (1) набуде вигляду

$$TdS = dU + pdV - PdE, \quad (3)$$

де  $E$  – напруженість поля,  $P$  – поляризація діелектрика.

Враховуючи, що поляризація речовини оцінюється через відносну діелектричну проникність і напруженість електричного поля:

$$P = (\epsilon - 1)\epsilon_0 E,$$

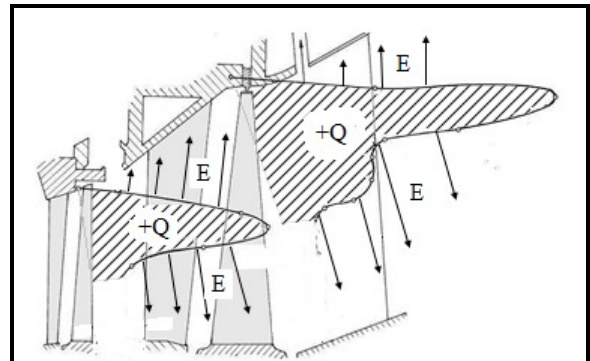


Рис. 7. Напруженість поля  $E$  щодо ядра об'ємного заряду  $Q$

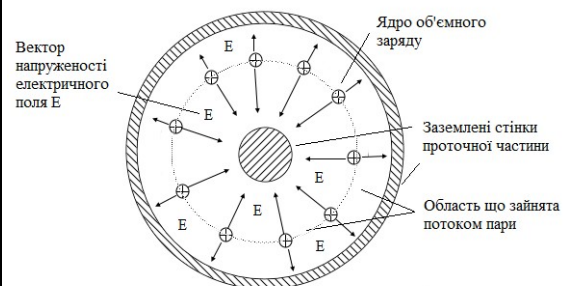


Рис. 8 Переріз проточної частини з ядром об'ємного заряду

де  $\varepsilon=f(T)$  – діелектрична проникність середовища;  $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – електрична постійна, отримаємо, що у разі впливу електричного поля рівняння стану робочого тіла визначатиметься не двома незалежними змінними  $p=f(T, V)$ , а трьома  $p=f(T, V, E)$ .

Отже, введення додаткової роботи (електричного поля) призводить до збільшення кількості змінних у рівняннях стану робочого тіла, а функція стану речовини описуватиметься трьома змінними. При цьому стає некоректним використання безпосередньо таблиці або діаграми термодинамічних властивостей води й водяної пари для визначення екстенсивних величин  $S, i, U$ . Отже, виникає необхідність знайти аналітичні співвідношення, що дозволяють провести кількісну оцінку зміни цих величин при дії електричного поля (ЕП).

Основними термодинамічними функціями, що описують стан робочого тіла, є вільна енергія  $A=U-TS$ , внутрішня енергія  $U$  й ентропія  $S$ .

Розглядаючи вплив ЕП як параметри незалежних змінних, як правило, обираються температура  $T$  і напруженість електричного поля  $E$ , у припущенні, що об'єм діелектрика підтримується постійним.

Тоді 1-й закон термодинаміки (3) можна подати так:

$$dU = TdS + EdD,$$

де  $D=\varepsilon_0\varepsilon E$  і  $EdD$  – електрична індукція й робота, що виконується ЕП у процесі поляризації, відповідно.

Із наведених співвідношень випливає, що значну роль при обліку дії ЕП відіграє діелектрична проникність середовища.

Визначимо термодинамічні функції робочого тіла при дії ЕП для найбільш загального випадку, коли  $\varepsilon=f(T, E)$ .

Зміна електричної індукції  $D$  матиме вигляд

$$\varepsilon_0^{-1}dD = \left( \varepsilon + E \frac{\partial \varepsilon}{\partial E} dE \right) + E \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} dT,$$

а зміна внутрішньої енергії

$$dU = TdS + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon d(E^2) + \varepsilon_0 E^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} dT + \varepsilon_0 E^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial (E^2)} d(E^2) = \frac{\partial U}{\partial T} dT + \frac{\partial U}{\partial (E^2)} dE.$$

Після певних перетворень диференціальне рівняння для внутрішньої енергії має такий вигляд

$$\frac{\partial U}{\partial E^2} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \left[ \varepsilon + T \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + 2E^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial E^2} \right].$$

У результаті його інтегрування отримаємо

$$U - U_0(T) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \int \left( \varepsilon + T \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + 2E^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial (E^2)} \right) d(E^2).$$

Для інтегрування необхідні дані щодо конкретної залежності  $\varepsilon=f(T, E)$ . Константа інтегрування залежить від  $T$ , бо рівняння інтегрується до часткових похідних.

Для ентропії та вільної енергії отримаємо залежності

$$S = S_0(T) + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \int \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} d(E^2); \quad A = A_0(T) + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \int \left( \varepsilon + 2E^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial (E^2)} \right) d(E^2).$$

Отже, якщо  $\varepsilon=\text{const}$ , ентропія не змінюється; якщо ж  $\varepsilon=\varepsilon(T)$ , то

$$S = S_0(T) + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} E^2. \tag{4}$$

Дія ЕП призводить також до зміни ізобарної теплоємності й ентальпії. Так, в ізобарно-ізотермічному процесі, як впливає з [4]

$$C_{p,E}(E, p, T) - C_p(T, p) = T \varepsilon_0 \int_0^E \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial T^2} E dE; \tag{5}$$

$$i(E, p, T) - i(p, T) = \varepsilon_0 \int_0^E \left( T \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} - \varepsilon + 1 \right) E dE. \tag{6}$$

Взявши до уваги, що  $\varepsilon$  – функція лише температури, і в ізотермічному процесі не змінюється, то  $\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} = \frac{d\varepsilon}{dT} = \text{const}$  і  $\frac{d^2 \varepsilon}{dT^2} = \text{const}$  відповідно рівнянням (4–6) шляхом нескладних перетворень остаточно отримаємо співвідношення:

$$\Delta S = S(E, p, T) - S_0(p, T) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \frac{d\varepsilon}{dT} E^2; \quad (7)$$

$$\Delta C_p = C_p(E, p, T) - C_{p_0}(p, T) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 T \frac{d^2 \varepsilon}{dT^2} E^2; \quad (8)$$

$$\Delta i = i(E, p, T) - i_0(p, T) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \left( T \frac{d\varepsilon}{dT} - \varepsilon + 1 \right) E^2. \quad (9)$$

Таким чином, процес розширення вологопарового потоку зарядженої пари з точки зору математичного моделювання може супроводжуватися зміною основних термодинамічних параметрів робочого тіла, а отже, можуть змінитися його розрахункові характеристики, у тому числі й втрати, що виникають у процесі розширення.

Важливу роль при визначенні ентропії, ентальпії та теплоємності робочого тіла при врахуванні впливу ЕП відіграє наявність залежності зміни діелектричної проникності від величини напруженості ЕП і температури пари у вологопаровій частині паротурбінної установки. Відомо, що для більшості діелектриків, що являють собою однорідне середовище, діелектрична проникність не залежить від напруженості електричного поля, зменшується з підвищенням температури, а для води й перегрітої водяної пари може бути знайдена за даними, що є в довідковій літературі, наприклад [6].

У даному випадку прийнято припущення, що джерелом поля є краплинна волога і поле діє тільки на водяну пару. У такій постановці завдання визначення діелектричної проникності суміші спрощується до визначення парової фази. Водночас залишається відкритим питання щодо впливу об'ємного заряду на його носій – краплі вологи.

Унаслідок цього виникає необхідність експериментального дослідження зміни діелектричної проникності суміші крапельної вологи й вологої пари, у тому числі для випадку, коли краплинна фаза електрично заряджена.

Раніше проведені фахівцями ППМаш експерименти на реальних турбінах дають змогу провести попередню кількісну оцінку зміни діелектричної проникності робочого тіла. Так, у ході експериментів на паровій турбіні Т-37/50-8.9 ТЕЦ-2 «Есхар» було виявлено [1], що вологопаровий потік найбільш сильно електризується в зоні останнього ступеня турбіни і вихлопного патрубку, зарядженість потоку вологої пари за останнім ступенем максимальна і може досягати величини  $10^5$ – $10^6$  В/м, а об'ємна щільність заряду потоку досягатиме  $10^{-3}$  Кл/м<sup>3</sup>.

Аналіз змін режиму роботи турбіни за нейтралізації об'ємного заряду пари показав, що основним результатом нейтралізації було зниження пульсацій потоку і протитиску за останнім ступенем на величину 100 Па, а також локальне збільшення швидкості потоку пари.

Використовуючи ці результати і приймаючи припущення, що зміни термогазодинамічних параметрів потоку пов'язані з його нейтралізацією, можна провести непряму оцінку величини діелектричної проникності потоку за останнім ступенем турбіни. Знаючи температуру за турбіною, зміну тиску і швидкості потоку (12 м/с), з'являється можливість визначити зміну ентальпії та ентропії за останнім ступенем у результаті нейтралізації потоку.

У даному випадку, маючи на увазі (7),

$$\frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{2\Delta S}{\varepsilon_0 E^2},$$

підставивши останнє в (9) і розв'язавши відносно  $\varepsilon$ , маємо

$$\varepsilon = 1 + \frac{2(T\Delta S - \Delta i)}{\varepsilon_0 E^2}.$$

У нашому випадку ця залежність дозволяє лише приблизно оцінити діелектричну проникність потоку для конкретних параметрів процесу й величини напруженості електричного поля, тому що на зміну параметрів за ступенем, безумовно, вплинули післяфакторні явища, пов'язані з електризацією потоку [7].

У результаті розрахунку величина  $\epsilon$  має значення, що дорівнює  $\sim 34$ . Враховуючи, що вміст вологи за останнім ступенем на досліджуваному режимі не перевищує 6%, використовуючи принцип адитивності, можна припустити, що для нейтральної вологої пари діелектрична проникність не перевищуватиме величини, близької до 4,4, що істотно менше отриманої нами величини  $\epsilon$ .

Проведені чисельні дослідження підтвердили необхідність врахування в існуючих фізичних і математичних термодинамічних моделях процесу розширення вологої пари явищ, зумовлених електризацією вологопарового потоку в ЦНТ, уточнення основних термодинамічних параметрів і розрахункових характеристик потоку електризованої вологої пари, для чого необхідно мати інформацію про значення його діелектричної проникності.

До сказаного варто додати, що, оскільки процес розширення пари в більшості ступенів ЦНТ відбувається нижче лінії насичення, необхідно мати інформацію про реальну щільність пари та її вологість, від якої істотно залежать додаткові втрати, що виникають у вологопаровому потоці, і ерозійно-корозійні процеси в останніх ступенях ЦНТ. Для можливості контролю якості роботи турбоустановки, впливу на її характеристики з метою підвищення ефективності й надійності, потрібно знати кінцеву вологість потоку на виході з турбіни і щільність пари на вході в конденсатор. При цьому слід зважати на те, що температура і тиск, які можуть бути виміряні при дослідженнях, однозначно визначають густину тільки перегрітої пари. У стані насичення, а також при фазовому переході температура і тиск робочого тіла є взаємопов'язаними параметрами, але не визначають його фазового стану, ентальпії та щільності.

У ряді робіт, наприклад [8], пропонується для визначення термодинамічних характеристик потоку використовувати електрофізичні характеристики вологої пари, зокрема, його діелектричну проникність. Проведені авторами дослідження дозволили запропонувати просту однопараметричну залежність, що дозволяє розрахувати густину води і водяної пари при відомих значеннях температури й діелектричної проникності на лінії насичення. Однак навіть у цій спрощеній моделі не береться до уваги природна електризація потоку.

### Висновки

Виходячи з усього вищесказаного і того факту, що вологість і зарядженість парового потоку взаємопов'язані з його діелектричною проникністю, а в даний час у науково-технічній літературі відсутні дані про реальну вологість і діелектричну проникність у подібних умовах, можна стверджувати, що дослідження взаємозв'язку вологості й діелектричної проникності електризованої вологої пари в турбіні становлять науковий і практичний інтерес. Отже, актуальним завданням є вивчення діелектричної проникності електризованого вологопарового потоку з метою отримання залежності зміни діелектричної проникності електризованої пари від температури потоку і напруженості електричного поля. Це дозволить при проектуванні низькопотенційної частини вологопарових турбоустановок більш реально описувати термогазодинамічні процеси, що відбуваються в них, з уточненими значеннями ентальпії, ентропії, теплоємності електризованої вологої пари, а це, у свою чергу, дасть змогу більш точно визначати втрати енергії в лопаткових апаратах ЦНТ. Крім того, наявність експериментальної залежності зміни діелектричної проникності вологої пари у обраному діапазоні зміни температур і напруженості електричного поля дозволить розробити методику визначення щільності, теплоємності й вологості потоку на виході з останнього ступеня в реальному масштабі часу при різних режимах експлуатації паротурбінних установок.

### Література

1. Тарелин А. А., Скляров В. П. Паровые турбины: электрофизические явления и неравновесные процессы. Санкт-Петербург: Энерготех, 2012. 292 с.
2. Мулев Ю. В. Управление встроенными сепараторами прямоточных котлоагрегатов СКД на основе контроля влажности отсепарированного пара: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Белорусский политехнический институт. Минск, 1984. 212 с.
3. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов: учеб. пособие для вузов. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
4. Сычев В. В. Дифференциальные уравнения термодинамики. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 251 с.
5. Базаров И. П. Термодинамика. М.: Высшая школа, 1991. 376 с.

6. Голубев Б. П., Смирнов С. Н., Лукашов Ю. М., Свистунов Е. П. Электрофизические методы исследования свойств теплоносителей. М.: Энергоатомиздат, 1985. 184 с.
7. Тарелин А. А. Постфакторные явления электризации влажно-парового потока в турбинах. *Теплоэнергетика*. 2017. № 11. С. 32–39.
8. Мулев Ю. В., Беляева О. В., Мулев М. Ю., Саплица В. В., Заяц Т. А. Диэлектрическая проницаемость как один из основных параметров контроля состояния рабочего тела. *Теплоэнергетика*. 2011. № 7. С. 36–40.

*Надійшла до редакції 22.02.2022*